

# **Análisis de la transmutación de Actínidos Minoritarios en un reactor rápido de sodio con modelo de carga homogéneo mediante el código MCNPX-CINDER**

Raquel Ochoa Valero<sup>a</sup>, Nuria García-Herranz, J. M. Aragonés

*Departamento de Ingeniería Nuclear, Universidad Politécnica de Madrid (UPM)  
C/ José Gutiérrez Abascal, 2; 28006 Madrid*

## **1. INTRODUCCIÓN**

El reactor rápido refrigerado por sodio (SFR) constituye uno de los conceptos más prometedores de los seis considerados en la Generación IV de reactores nucleares, encontrándose actualmente en fase de investigación. En este marco surge el proyecto europeo CP ESFR (Collaborative Project for an European Sodium Fast Reactor) cuya finalidad es analizar los diversos desafíos y oportunidades que el desarrollo de este tipo de reactores plantea, ya sea en términos de seguridad, tecnología de sodio, capacidades transmutadoras, etc.

La gestión de los actínidos minoritarios (MA) es uno de los puntos fundamentales que deben ser analizados. Debido al espectro rápido de estos reactores, pueden ser cargados parcialmente con MA con el fin de disminuir considerablemente su inventario en el combustible gastado. Sin embargo, ello tiene un impacto significativo tanto en aspectos operacionales como de seguridad.

El objeto del presente trabajo es evaluar la capacidad transmutadora de actínidos minoritarios de este tipo de reactores suponiendo un modelo de carga homogéneo. Se determina la evolución isotópica de los actínidos a lo largo del quemado (analizando las principales cadenas de formación de cada isótopo), así como la evolución de la reactividad y los coeficientes de reactividad (Doppler, vaciado del sodio, fracción de neutrones diferidos). Para ello se emplea el código de transporte neutrónico MCNPX acoplado con el código de inventario CINDER90.

## **2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO SFR EMPLEADO PARA EL ANÁLISIS**

El modelo considerado para este análisis corresponde al diseño del núcleo del reactor ESFR de 3600 MWth. Dicho núcleo consiste en dos regiones radiales de combustible MOX con distinta composición de plutonio, una serie de elementos de control, blankets axiales y reflector radial, tal y como se refleja en la Figura 1. Para todos los cálculos se consideraron las barras de los elementos de control completamente extraídas de la zona activa del núcleo, ocupando su lugar una columna de sodio enmarcada por la estructura de acero del elemento de control. Para poder analizar el efecto de la disposición radial del combustible, se dividió la región interna de combustible en 3 anillos, quedando dividido el núcleo, por tanto, en 4 anillos (1 correspondiente a la región externa y 3 a la interna).

---

<sup>a</sup> Primer autor: [raquel@din.upm.es](mailto:raquel@din.upm.es)  
Tel: +34 91 336 3108; Fax: +34 91 336 3102

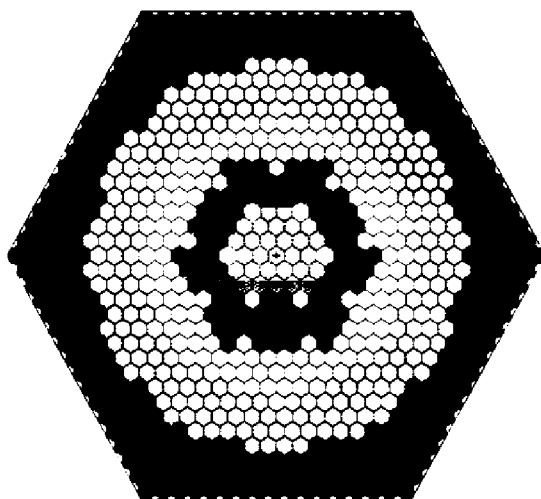


Figura 1. Sección transversal del núcleo. Región de combustible dividida en 4 anillos: 3 para la región interna de combustible (rojo, azul, amarillo) y 1 para la región externa (verde). Reflector (marrón).

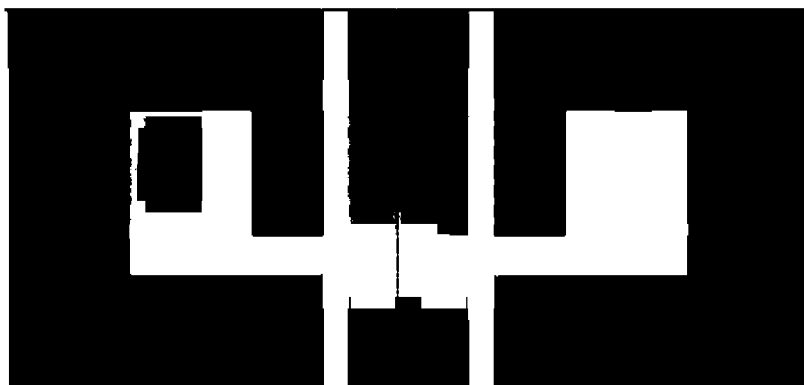


Figura 2. Corte axial del núcleo. Elementos de control extraídos (blanco).

Se ha considerado un modelo en el que los actínidos minoritarios se diluyen homogéneamente en el combustible en una concentración de 4% de MA. La composición inicial del vector MA se indica en la Tabla I. La longitud del ciclo se estima en 2050 EFPD.

Tabla I. Composiciones iniciales del vector MA

Isotope	Np237	Am241	Am242m	Am243	Cm242	Cm243	Cm244	Cm245	Cm246
% w	10.86	60.62	0.24	15.7	0.02	0.07	5.14	1.26	0.09

### 3. CÓDIGO MCNPX-CINDER

MCNPX es un código de transporte de Montecarlo, que tiene acoplado el código de inventario CINDER90. Para cada paso de quemado, MCNPX y CINDER intercambian información de acuerdo al esquema *predictor-corrector*, representado en la Figura 3.

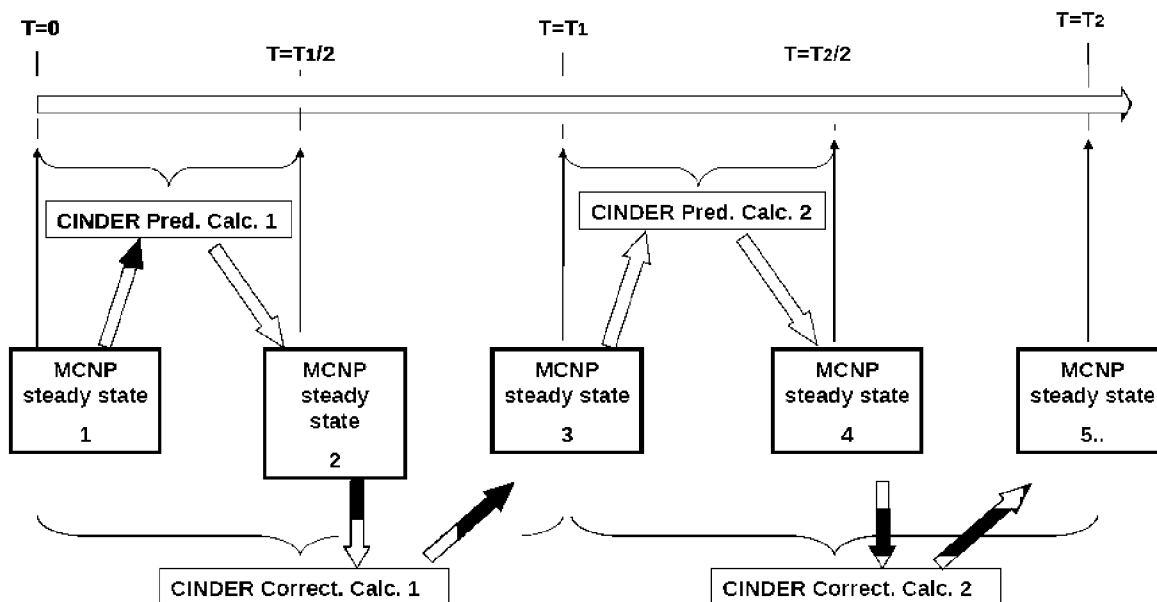


Figura 3. Implementación del código MCNPX.

Algunos datos de interés sobre el código MCNPX-CINDER:

- MCNPX calcula tasas de reacción para todos los isótopos para los que dispone de secciones eficaces de transporte, y para las siguientes reacciones: (n, gamma), (n,fisión), (n,2n), (n,3n), (n, alfa) & (n, protón).
- CINDER90 considera aquellas reacciones no tenidas en cuenta por MCNPX, así como el conjunto de tasas de reacción para los isótopos que no contengan información sobre las secciones eficaces de transporte. Para ello utiliza la librería de secciones eficaces interna de CINDER en 63 grupos (cinder.dat).
- Por este motivo, MCNPX calcula el flujo en 63 grupos y lo envía a CINDER para colapsar su librería de secciones eficaces en 63 grupos, y calcular así el conjunto completo de reacciones.
- Sin embargo, las secciones eficaces utilizadas por CINDER fueron colapsadas con un espectro genérico que puede ser o no representativo del sistema a analizar y por lo tanto puede conducir a discrepancias en el inventario isotópico.
- CINDER90 utiliza el método Markov para transformar el sistema de ecuaciones no lineales en un conjunto de ecuaciones diferenciales lineales, en lugar de usar el método de la matriz exponencial, como lo hacen ORIGEN o ACAB.

### 4. RESULTADOS

Se ha realizado un cálculo de quemado aplicado al núcleo completo 3D con MCNPX-CINDER. Para el cálculo, se utilizaron 5 pasos de tiempo hasta los 2050 días de irradiación. La librería utilizada para todos los cálculos con MCNPX es la JEFF-3.1.1, previamente procesada en formato ACE a las distintas temperaturas de trabajo mediante NJOY99.

Los resultados suministrados son:

- Espectro de flujo neutrónico a BOL, 820 y 1230 días de irradiación

- K efectiva y variación de reactividad con el quemado
- Balance de la masa de actínidos y tasa de transmutación
- Ganancia reproductora (Breeding Gain)
- Coeficientes de reactividad al cabo de BOL, 820 y 1230 días de irradiación
  - Coeficiente Doppler (sólo a BOL)
  - Fracción efectiva de neutrones diferidos
  - Efecto de vaciado de sodio

#### 4.1. Espectro del flujo neutrónico

En la figura 4 se muestra el espectro de flujo neutrónico correspondiente a una celda de la región interna del núcleo en el momento de la carga, y tras 820 y 1230 días de irradiación. Se puede observar que el espectro permanece prácticamente constante a lo largo del quemado. La energía media del espectro apenas varía, tomando valores desde 0.445 MeV a BOL hasta 0.449 MeV a 820 EFPD.

Este resultado es relevante de cara a obtener resultados fiables con pasos de tiempo relativamente largos, tal y como los utilizados en este estudio. Al no variar mucho el espectro, no son necesarios muchos cálculos de transporte con MCNPX a lo largo del quemado, reduciéndose el tiempo computacional. Por otra parte, se comprobó que pasos de tiempo más pequeños tampoco influían en la predicción de la concentración de los principales actínidos por parte del código de inventario. Por ello, los pasos de quemado grandes tomados en MCNPX-CINDER suministran resultados suficientemente precisos.

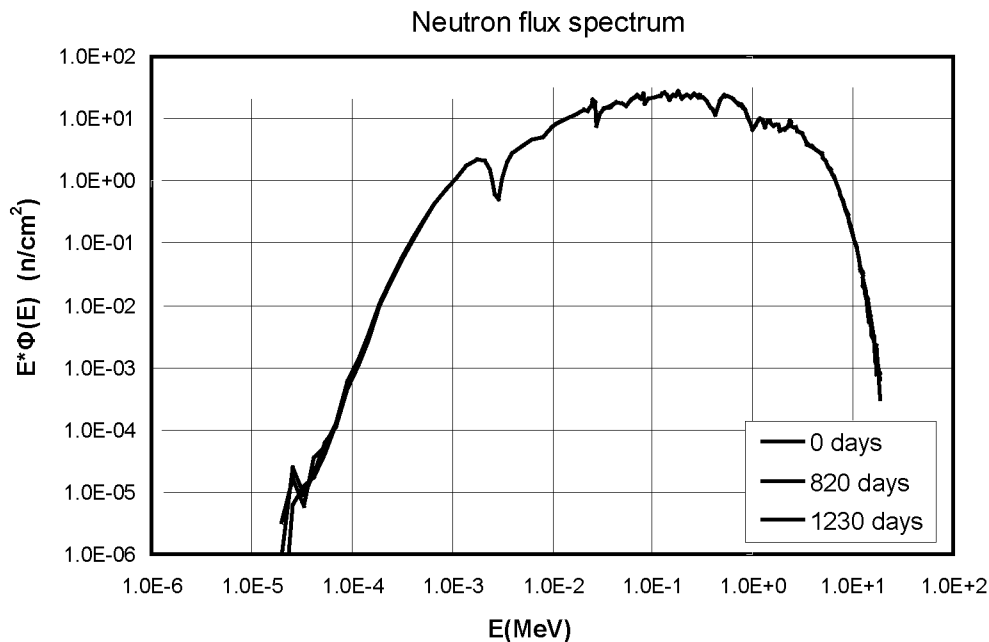


Figura 4. Espectro de flujo neutrónico a BOL, y al cabo de 820 y 1230 días de irradiación.

#### 4.2. K efectiva y variación de reactividad con el quemado (reactivity swing)

La k-efectiva a lo largo del quemado del ciclo se presenta en la Tabla II. Debido a la composición inicial, el núcleo es subcrítico a BOL, y debido a la generación de plutonio junto a la formación de determinados actínidos minoritarios, cuya contribución a la reactividad es positiva, la k-efectiva aumenta hasta estabilizarse en un valor en torno a 1.04.

- Asimismo, se ha calculado la variación de reactividad en el núcleo (reactivity swing) a lo largo del ciclo, siendo de 5167 pcm de BOL a EOL, y de 1042 pcm de 820 a 1230 EFPD.

Tabla II – Keff y otros parámetros a lo largo del quemado

Time (days)	keff	standard deviation	Flux (n/cm2.s)	Burnup (GWd/MTU)
0	0.98658	0.00042	2.170E+15	0.000E+00
410	1.00558	0.00042	2.330E+15	1.990E+01
820	1.01986	0.00046	2.460E+15	3.980E+01
1230	1.03081	0.00041	2.670E+15	5.970E+01
1640	1.03748	0.00044	2.730E+15	7.950E+01
2050	1.03957	0.00042	2.790E+15	9.940E+01

#### 4.3. Balance de masa

En la tabla III se muestra el balance de masa para cada elemento junto con el del conjunto de los actínidos minoritarios, y en la tabla IV se muestra para los principales isótopos. En ambas tablas se puede ver las tasas de transmutación (TR) al cabo de 820 y 1230 días de irradiación.

Tabla III – Masa y Tasa de Transmutación (definida como  $M(T)/M(0)-1$ )

	kg BOL	kg 820d	kg 1230d	TR 820d (%)	TR 1230d (%)
U	59966.9	56813.8	55303.9	-5.3	-7.8
Np	501.4	396.3	350.5	-20.9	-30.1
Pu	11299.3	11842.3	12041.5	4.8	6.6
Am	2276.5	1741.3	1530.8	-23.5	-32.8
Cm	195.7	356.1	371.1	82.0	89.7
MA	2973.5	2493.7	2252.4	-16.1	-24.3

Tabla IV – Masa y Tasa de Transmutación (definida como  $M(T)/M(0)-1$ )

	kg BOL	kg 820d	kg 1230d	TR 820d (%)	TR 1230d (%)
U234	0.0	8.1	13.1	-	-
U235	149.9	99.8	82.1	-33.4	-45.2
U236	0.0	11.8	15.7	-	-
U238	59817.0	56694.0	55193.0	-5.2	-7.7
Np237	501.4	385.6	340.1	-23.1	-32.2
Np239	0.0	10.8	10.5	-	-
Pu238	406.8	617.9	703.7	51.9	73.0
Pu239	5397.0	5949.4	6125.6	10.2	13.5
Pu240	3376.9	3383.0	3402.7	0.2	0.8
Pu241	936.8	717.6	650.3	-23.4	-30.6
Pu242	1181.9	1174.4	1159.3	-0.6	-1.9
Am241	1802.5	1309.8	1122.1	-27.3	-37.7
Am242m	7.1	25.0	25.2	249.4	252.3
Am243	466.8	406.6	383.4	-12.9	-17.9
Cm242	0.6	87.9	77.2	14828.6	13006.0
Cm243	2.1	5.7	7.0	170.5	231.4
Cm244	152.8	214.3	233.4	40.2	52.7
Cm245	37.4	42.5	46.4	13.7	23.9
Cm246	2.7	5.6	7.1	108.5	164.9
TOTAL	74239.7	71149.7	69597.9	-4.2	-6.3

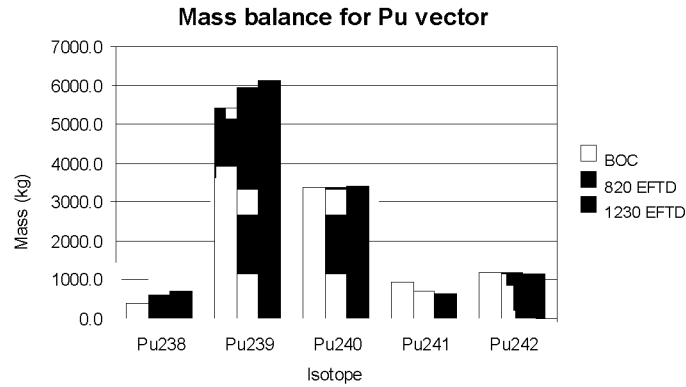


Figura 5. Balance de masa del vector de plutonio.

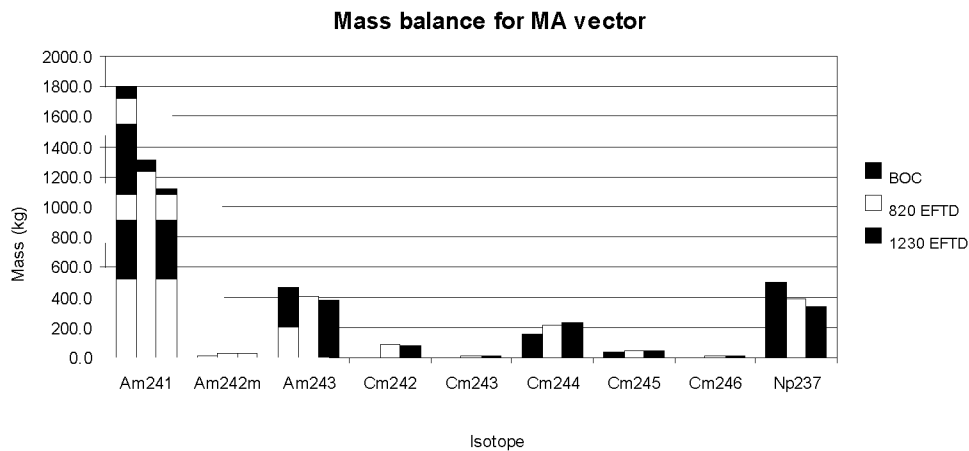
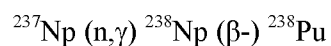
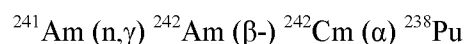


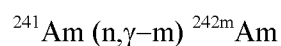
Figura 6. Balance de masa para los actínidos minoritarios (MA).

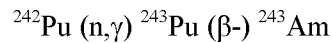
Para poder comprender la evolución isotópica mostrada en las tablas y figuras previas, se realizó un análisis mediante el código de inventario ACAB [ref. 5] de las principales cadenas de formación de los isótopos más relevantes, concluyéndose que:

- Las masas de uranio, neptunio y americio disminuyen en media, mientras que las de plutonio y curio aumentan.
- En cuanto al plutonio, los principales responsables del aumento de la masa de plutonio son el Pu238 y Pu239.
  - El Pu239 viene de la transmutación del U238 tras una desintegración beta.
  - El Pu238 viene del Am241 y Np237. El Am241 se transmuta en Cm242 tras una captura neutrónica y una desintegración beta; el Cm242 decae rápidamente a Pu238 +  $\alpha$  con un período de semi-desintegración de 163 días. Además el Pu238 también es producido por desintegración beta del Np238 (T1/2: 212 días), el cual se produce continuamente por el Np237 bajo condiciones de irradiación.

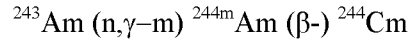
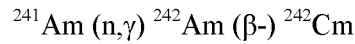


- Respecto a la evolución del americio, sus isótopos desaparecen por fisiones y capturas neutrónicas; transmutándose en Cm242 y Cm244. Por otro lado; Am242m y Am243 pueden aparecer según las siguientes cadenas:





- La masa de curio aumenta a lo largo del quemado. El Am241 se transmuta a Cm242, y dado que el Am241 es uno de los isótopos más abundantes a BOL, la cantidad de Cm242 crece, dando lugar a la mayor tasa de transmutación (TR). El Am243 se transmuta a Cm244, por lo que su masa aumenta a lo largo del ciclo.



- La cantidad total de MA disminuye, con una TR de -16.1% y -24.3% a 820 y 1230 EFPD, respectivamente, debido al Np237, Am241, y Am243.
- La TR total (considerando U, Pu y MA) es negativa, -4.2% y -6.3% a 820 y 1230 EFPD, respectivamente.

#### 4.4. Ganancia de Reproducción (Breeding Gain)

Otro parámetro interesante para los reactores rápidos es la Ganancia de Reproducción, ya que estos reactores pueden regenerar material fisible. La tasa de reproducción (Breeding Ratio) es el cociente entre la materia fisible producida y la materia fisible consumida, y la BG es igual a la BR -1:

$$IBG = \frac{\text{Masa fisible producida} - \text{Masa fisible consumida}}{\text{Masa fisible consumida}}$$

A partir de la información suministrada por la salida de MCNPX respecto a las tasas de reacción y balance de masas para cada isótopo y paso de quemado, se ha estimado la Ganancia de reproducción. En la tabla VII se muestran los resultados desde BOL a 820EFPD, a 1230EFPD, y de 820 a 230EFPD.

Tabla VII – Ganancia de reproducción en el núcleo de BOL a 820EFPD, a 1230EFPD, y de 820 a 1230EFPD.

820 EFTD	1230 EFTD	820-1230EFTD
0.2601	0.1490	0.0646

Estos resultados concuerdan con el aumento de la masa de plutonio e implican que el reactor ESFR es ligeramente reproductor sin blankets radiales.

#### 4.5. Evolución radial de Pu and MA

Para analizar la influencia radial de la transmutación, se estudia la evolución de la densidad de MA y Pu en el combustible a lo largo del ciclo para los cuatro anillos axiales considerados. Las figuras 7 y 8 muestran el efecto radial de la transmutación del Pu y MA, respectivamente, en el combustible en un paso de quemado específico, 820 EFPD. De estas figuras se puede inferir que:

- Los anillos 1, 2 y 3, con idéntica composición inicial, tienen una evolución similar a lo largo del quemado. Sin embargo, se aprecia una tendencia a disminuir en la densidad del Am<sup>241</sup> y Np<sup>237</sup> a medida que el anillo se encuentre más en la periferia del núcleo, mientras que la tendencia opuesta se observa para el Pu<sup>238</sup> y Pu<sup>239</sup>.
- El anillo 4 (región externa del núcleo), debido a que tiene una composición inicial distinta, más enriquecido que los correspondientes a la región interna, muestra una evolución distinta.

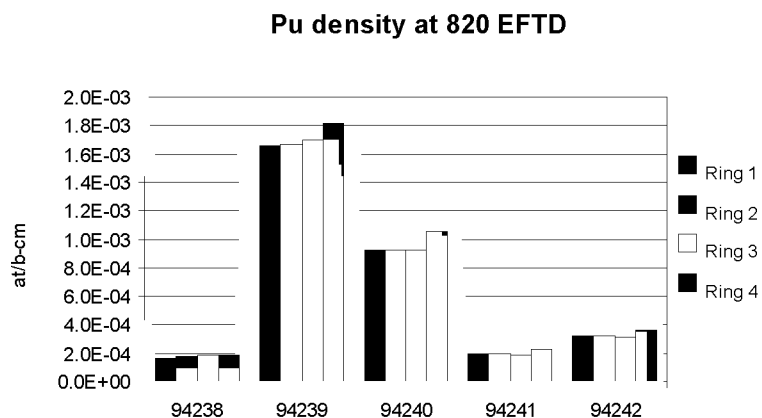


Figura 7. Evolución radial del Plutonio.

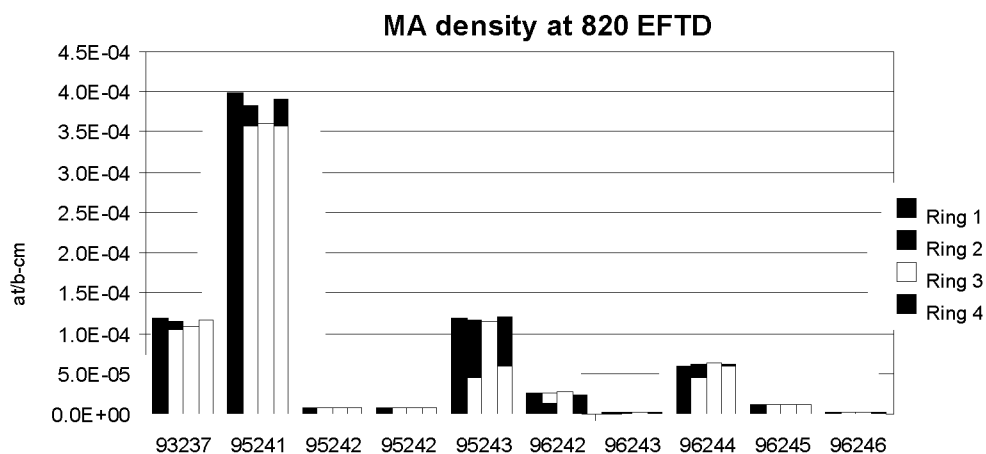


Figura 8. Evolución radial de los Actínidos Minoritarios (MA).

#### 4.6. Coeficientes de reactividad

Para comprobar los efectos que tiene en la reactividad la introducción de MA en el combustible, a continuación se estudian algunos de los principales coeficientes de reactividad a BOL, y al cabo de 820 y 1230 días de irradiación.

##### Doppler

Se calcula el coeficiente Doppler según la siguiente fórmula:

$$K_D = \frac{\rho_{DOP} \bar{\rho}_{NEORM}}{1 - \frac{T_{FUEL} + 1000}{T_{FUEL}}}$$

siendo  $T_{DOPPLER} = T_{FUEL} + 1000K$ . Los resultados a BOL se muestran en la tabla VII.



Tabla VIII – Coeficiente Doppler a BOL, 820, and 1230EFPD

	<b>BOL</b>	<b>820d</b>	<b>1230d</b>
<b>K<sub>D</sub> (pcm)</b>	-755.31	-623.13	-520.27

Se observa que el Doppler disminuye en valor absoluto a lo largo del ciclo, permaneciendo en valores negativos.

#### Fracción de diferidos

La fracción efectiva de neutrones diferidos,  $\beta$ , se puede calcular siguiendo la expresión:

$$\beta_t = \frac{\nu_d}{\nu_t} = \frac{K_t - K_p}{K_t}$$

La Tabla IX muestra los resultados obtenidos, deduciéndose que la  $\beta$  disminuye a medida que avanza el quemado del ciclo, como consecuencia de la desaparición de los isótopos de uranio, con mayores valores de  $\beta$ .

Tabla IX – Fracción de neutrones diferidos ( $\beta$ ) a BOL, 820, and 1230EFPD

	<b>BOL</b>	<b>820d</b>	<b>1230d</b>
<b><math>\beta</math> (pcm)</b>	398.41	327.01	254.50

#### Efecto de vaciado de sodio

Los reactores rápidos refrigerados por sodio presentan un gran inconveniente en cuanto a seguridad debido a la inserción positiva de reactividad producida cuando el refrigerante (sodio) es vaciado accidentalmente del núcleo. El peor escenario se produce cuando el sodio desaparece sólo en la zona activa del combustible, y por lo tanto, ese es el caso estudiado en este apartado.

El efecto de vaciado de sodio se simuló mediante la disminución de la densidad del sodio en un factor  $10^{10}$ . En la tabla X se muestra la inserción de reactividad producida. Se comprueba que el efecto de vaciado del sodio empeora según avanza el tiempo de irradiación. La diferencia en la inserción de reactividad desde BOL a 1230 EFPD es alrededor de 120 pcm.

Tabla X – efecto de vaciado de sodio a BOL, 820, y 1230 EFPD

	<b>BOL</b>	<b>820d</b>	<b>1230d</b>
<b><math>\Delta\rho</math> void (pcm)</b>	2056.05	2163.55	2175.97

## 5. CONCLUSIONES

MCNPX ha demostrado ser una herramienta útil para analizar cálculos de transmutación. Sin embargo, se debe tener en cuenta que al tratar isótopos metaestables se encontraron una serie de discrepancias en el convenio de nomenclatura usado por MCNPX y CINDER90. Como consecuencia, no es posible predecir correctamente la evolución de los isótopos que tengan estados metaestables, especialmente el Am242, pudiendo haber grandes discrepancias en estos isótopos si se comparan los resultados de MCNPX con los de otros códigos.

En cuanto a las capacidades transmutadoras utilizando el modelo de carga homogéneo de un 4% de MA se puede concluir que:

- Se trata de un modelo con una capacidad de transmutación de actínidos minoritarios considerable: del 16.1% a 820 EFPD y 24.3 % a 1230 EFPD. No es posible reducir completamente la cantidad de actínidos minoritarios debido a la formación de los isótopos de curio por transmutación de los isótopos de americio. Sin embargo, es posible reducir en gran magnitud la masa de Am241, cuya concentración en el combustible gastado es significativa.
- La ganancia de reproducción es ligeramente positiva, pero cercana a cero. Este resultado es interesante desde un punto de vista neutrónico, pues permite alargar la duración del ciclo. La ganancia de reproducción es positiva debida principalmente al aumento en la masa de Pu239, como consecuencia de la transmutación del U238, pero este efecto es ligeramente compensado por la disminución de Pu241.
- Los coeficientes de reactividad empeoran a lo largo del ciclo, dependiendo directamente de la evolución del inventario isotópico. Desde BOL a 1230 EFPD la fracción de diferidos disminuye en un 36% y el coeficiente de vaciado de sodio aumenta unas 120 pcm. El coeficiente Doppler también empeora a lo largo del ciclo, disminuyendo en valor absoluto.

## 6. REFERENCIAS

1. ESFR “Working Horses” core concept, CEA Cadarache, June 2009
2. F. Martín-Fuertes, “Technical notes with the specifications for calculations involving minor actinides recycling”, WP4 SP2.1, CIEMAT, July 2009
3. John S. Hendricks et al., "MCNPX 2.6.0 - Extensions", LA-UR-08-2216, April 11, 2008
4. MCNPX User's Manual. Version 2.6.0, LA-CP-07-1473, April 2008
5. J. Sanz, O. Cabellos, N. García-Herranz, “ACAB-2008, ACTivation ABacus Code V2008”, NEA Data Bank (NEA-1839), 2008

## AGRADECIMIENTOS

El trabajo de investigación que ha conducido a los resultados aquí presentados ha sido parcialmente financiado por la Comisión Europea bajo el séptimo programa marco [FP7/2007-2013] dentro del proyecto integrado **CP ESFR** “Collaborative Project for an European Sodium Fast Reactor”, con número de contrato **232658** y por el Consejo de Seguridad Nuclear a través de una beca de la cátedra Federico Goded.